实时动态耦合模型及其在洪水风险图中的应用

付成威,苑希民,杨 敏

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:将水力学的一维模型和二维模型实时动态耦合,可以解决溃堤、漫堤等洪水演进问题.但传统的一维和 二维洪水演进模型通常是独立的模块,且模拟计算所花时间较长,结果也不够准确.把独立的一维和二维模型 通过时间同步和空间耦合节点的对应关系,建立了一、二维实时动态耦合模型.利用干水深和湿水深理论,改进 了传统的洪水演进模型.采用该模型模拟了谷堆圩蓄滞洪区的溃堤洪水演进情况,通过历史洪水对模型进行了 验证,基于模拟结果绘制了规范的洪水风险图.结果表明:一、二维水动力实时动态耦合模型在模拟溃堤洪水 时,模拟计算结果较传统的方法更为合理,且花费时间更少.

关 键 词:一、二维动态耦合模型;干水深;湿水深;洪水风险图 **中图分类号:**TV122;TV86 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-640X(2013)05-0032-07

利用水动力学模型来模拟水流的各种问题,是当前国内外学者研究的热点之一^[1-4].一维水力学模型通常用来模拟长宽比例较大的区域(如河道、沟渠等),其模拟的方法通常是将一维区域划分成若干个断面节点,通过求解各断面节点的数据来完成一维区域的模拟^[5-6].二维水力学模型通常用来模拟长度和宽度相当的区域(如蓄滞洪区、水库等),该模型通常将模拟区域划分成多个规则或不规则网格,通过求解各网格的数据来完成二维区域的模拟^[7-8].一维模型和二维模型的数值解法通常是有限差分法、有限单元法、特征线法以及有限体积法等.

近年来,一维模型以及二维模型在建模、求解、优化、应用等方面,都有了很大进步^[9-10],但同时也需要解 决下面 2 个问题.一是当模拟的内容同时涉及到一维模型和二维模型两种情况时,如何正确处理两种模型之 间的联系.比如当模拟溃堤、漫堤洪水时,由于一维河道和二维洪泛区的水位是相互影响的,河道和洪泛区某 时刻的水位,直接决定了该时刻是进洪过程还是退水过程,而河道和洪泛区的水位差,则直接决定了溃堤、漫 堤处的流量和动量.因此,在模型溃堤、漫堤等洪水演进问题时,必须考虑一维河道与二维洪泛区每一个时间 步长里的流量和动量交换,因为该时间步长的流量和动量影响着下一时间步长中河道和洪泛区的水位.一维 河道的断面节点和二维模型的网格也必须建立起某种对应关系,建立对应关系时还必须考虑堤防、滩地、河 槽等因素对一维和二维模型之间流量与动量交换的影响.二是人们对模拟精度的要求越来越高,以至于河道 断面节点以及网格划分越来越细,计算时间步长越来越短,这些都导致了计算耗时越来越长.

为了解决以上2个问题,本文将一维和二维模型通过时间同步和空间耦合节点的对应关系,建立了一、 二维实时动态耦合模型.本模型与原有的一、二维耦合模型^[11-12]相比,充分考虑了一维模型与二维模型在时 间与空间上的流量和动量交换,更具实时性和动态性.模型利用干水深和湿水深理论,优化了传统的洪水演 进模型,大幅减少计算时间.

收稿日期: 2013-03-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59809007)

作者简介:付成威(1988-),男,四川雅安人,硕士研究生,主要从事水动力学方面的研究. E-mail: opqopqfcw@ gmail. com

1 一、二维实时动态耦合模型理论

1.1 一维河道水力学模型

一维河道水力学模型采用圣维南方程组作为控制方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{Q |Q|}{C^2 A R} = 0 \end{cases}$$
(1)

式中:x 为距离坐标;t 为时间坐标;A 为过水断面面积;Q 为总流量;q 为侧向流量;Z 为水位;C 为谢才系数; R 为水力半径;g 为重力加速度.

一、二维水动力学耦合模型,涉及溃堤、漫堤等条件下的侧向流量,需要考虑旁侧入流条件.河道上游和 下游的水位、流量过程,作为一、二维耦合模型的边界条件.侧向流量作为一维模型与二维模型耦合的内部 条件.

1.2 二维洪水演进水力学模型

二维洪水演进模型采用二维浅水动力学方程组作为控制方程,模型如下:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hs \tag{2}$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial hvu^2}{\partial y} = fvh - \frac{gh\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{p} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xx}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + hu_s s$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hv}{\partial x} + \frac{\partial hvv^2}{\partial y} = -fuh - \frac{gh\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{p} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s s$$
(3)

式中: x, y, z为空间笛卡尔坐标系; η 为水位;h为静止水深;u, v为流速在x, y方向上分量的平均值; p_a 为当地 大气压; ρ 为水密度; ρ_0 为参考水密度;f为科里奥利参量; $S_{xx}, S_{yy}, S_{yx}, S_{yy}$ 为辐射应力分量; $T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$ 为 水平黏滞应力; $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{bx}, \tau_{by}$ 为水面与河床边界水流切应力在x, y方向上的分量;S为源汇项; u_s, v_s 为源汇项 水流流速.

1.3 干水深和湿水深改进模型

在计算过程中设定干水深和湿水深,可以提高计算效率.由于洪水演进模拟是浅水流动的问题,每个网格的水深值相对较小.因此,当网格水深小于某值时,可以改变该网格属性,以提高计算效率,增加计算稳定性.

在每一个时间步长计算前,都需要对网格的水深进行判断,分析每个网格的水深是否达到干水深或湿水 深.当网格水深小于干水深时,该网格将直接从计算中移除,不参加模型计算.当网格水深大于干水深而小于 湿水深时,计算时只计算该网格的质量通量,忽略该网格的动量通量.当网格水深大于湿水深时,该网格需要 同时计算质量通量和动量通量.

1.4 一、二维水力学模型耦合

一、二维水力学模型的耦合,关键在于寻找一维和二维模型耦合的接口,使一维和二维模型在时间与空间关联保持一致.在任意时间点,一维与二维模型都有水的流量与动量的交换.在耦合点处,一维和二维模型的通过水位与流量关系进行耦合.

1.4.1 一、二维模型时间的耦合 在 T₁ 时刻,耦合点处一维模型的水位为 h₁₁,二维模型的水位为 h₂₁.比较

 h_{11} 与 h_{21} 以及一维、二维模型的地形条件,判断耦合处的流量和动量的交换情况. 经过 Δt 时间后的 T_2 时刻, 耦合点流量交换量为 ΔQ .同时一维模型外边界条件发生变化,水位发生 Δh_1 的变化. 通过 $h_{11},\Delta Q,\Delta h_1,$ 推求 出 T_2 时刻一维模型的水位 h_{12} .同时,二维模型外边界水位发生 Δh_2 的变化,通过 $h_{21},\Delta Q,\Delta h_2$ 推求出 T_2 时刻 二维模型水位 h_{22} .同理可推求出 T_n 时刻的模型情况.

1.4.2 一、二维模型空间的耦合 一、二维模型的耦合,必须 明确一维和二维模型流量和动量的交换位置,即找到一维河 道耦合处的里程,以及该里程对应的二维模型网格编号.一维 河道模型的河道断面长度不能忽略,耦合点不一定在河道与 网格交界处(图1).从图1中可见,一维模型耦合里程点和二 维模型耦合处的网格并不重叠,一维模型和二维模型的流量 和动量的交换位置不在一个地点.



Fig. 1 Space coupling of 1D-2D models

2 算例及模型验证

2.1 模拟区域简介

"谷堆圩地区洪水风险图编制"是水利部"全国洪水风险图编制项目(二期)"的试点之一. 该区位于河 南省信阳市淮滨县东南部地区,淮河右岸,淮河、白露河、思河三面围绕,属于半封闭圩区. 圩区总面积 83.7 km²,共有孙岗村等25个行政村,165个小区,234个小组. 耕地48 km²(约7.2万亩),人口5.51万. 该 区堤防全长47.08 km,设计标准为10年一遇.

本文以1991年洪水(10年一遇洪水)为例建立模型,并采用1980年历史洪水作为验证.根据实际工程 需求以及历史洪水情况,选择朱湾地区作为溃堤进洪 点,吴寨作为蓄滞洪区退水口,如图2所示.模型总共 有3个外边界条件,分别是河道上游和下游水位过程、 蓄滞洪区退水口水位过程.溃口为一、二维模型耦合的 内部边界条件.



2.2 模型建立

2.2.1 一维模型 模型的河道长度为40407 m,河道走向与淮河河谷实际走向一致.河道每1000 m设立 一个控制断面,河段断面形状如图3所示.其中,断面河谷高程19 m,河道右岸有5 m高的堤防,溃口不设置 堤防.

2.2.2 二维模型 网格采用非结构化三角形网格. 网格平均边长约 100 m,模型共 13 785 个网格,7 111 个 结点. 利用 DEM 数据对每个网格进行高程插值,计算最大时间步长选择为 10 s,最小时间步长选择为 0.01 s. 网格划分见图 4.





2.2.3 耦合模型 一、二维模型耦合点为上游朱湾溃口处,溃口宽度 500 m,溃口处流量交换采用堰流公式. 当溃口处河道水位大于蓄滞洪区水位,溃口流量为正,当溃口处河道水位小于蓄滞洪区水位,溃口流量为负.

2.3 模型验证和参数率定

谷堆圩地区在1980年曾发生过溃堤事件,堤防在蔡台子处(如图2所示)发生溃堤,根据实际调研资料,洪水演进了24h后,平均淹没水深约2m,溃口附近最大水深近2m.那场洪水将谷堆圩地区80%以上的地区淹没,平均淹没水深为2m.且洪水漫过思河堤防,演进到思河南部的期思圩区.

本文利用 1980 年的历史洪水条件,对那场洪水的情况进行了模拟,其模拟结果如图 5 所示,溃口处最大 淹没水深为 2.15 m,平均淹没水深 2.1 m.水深大于 0.1 的网格占总网格的75.7%,洪水演进到了南部的期 思圩区.模拟结果与实际资料相比,溃口最大淹没水深误差为 0.15 m,平均淹没水深误差 0.1 m.淹没范围误 差 5%.1980 年谷堆圩地区的地形,与现在的地形已有相当大变化,这是引起误差的主要原因.



在验证历史洪水的同时,也对模型的各种参数(如糙率、阻水建筑物阻水系数等)进行率定,使模拟的结果与实际情况一致.其中,糙率是影响模拟结果最明显的参数,通过实地调研、各种资料的查阅,谷堆圩地区在 1980年的地形以及植被等情况与现在差别不大,可将模拟区域的糙率设定为与历史洪水率定的结果一致.

2.4 结果与分析

2.4.1 模拟时间 应用一、二维实时动态耦合模型,对谷堆圩地区 1991 年洪水(10 年一遇)进行模拟. 1991 年洪水的洪峰持续了4 d,演进了3 d,总共模拟了7 d.模拟采用普通配置计算机,模拟所花时间为:传统一维模型 125 min,传统二维模型 310 min,一、二维实时动态耦合模型 422 min,干、湿水深理论改进的耦合模拟 333 min,可见一、二维实时动态耦合模型花费的时间约等于传统的一维和二维模型花费时间之和,采用干、湿水深理论改进模型后,花费的时间降低了 21%.

2.4.2 河道模拟 一维河道的模拟结果如图 6 所示.模拟结果表明,一、二维实时动态耦合模型与传统的模型相比,河道水位比传统模型偏低,河道流量比传统模型偏小.且河道水位和流量越高,两种模型的水位差和流量差越明显.



Fig. 6 Simulation results of 1D river channel

这是因为耦合模型充分考虑了一维河道与二维洪泛区之间的流量和动量的交换,动态计算出了从河道 流入泛洪区的水流量.当溃堤发生时,溃口分走一部分河道流量,致使河道水位降低,下一时刻溃口分流减 小,与实际情况相符.真正意义上将一维河道模拟和二维洪泛区模型耦合在一起.

2.4.3 洪泛区模拟 二维洪泛区的模拟结果如图 7 所示,结果表明:耦合模型与传统模型的洪水演进趋势 大致相同.不同的是,传统模型网格的平均水深比耦合模型大,这是由于耦合模型在计算溃口处流量时充分 考虑了一维河道的水位,而一维模型计算的结果表明了耦合模型的河道水位比传统模型低,因此,耦合模型 模拟结果的网格水深小于传统模型.



Fig. 7 Simulation results of 2D flood plain

2.5 洪水风险图编制

根据模拟结果来进行洪水风险图编制.编制洪水风险图必须遵循《洪水风险图编制导则》和《洪水风险 图编制技术细则》中的规定,采用指定的投影坐标系,并包含图式、图面、图例、色彩、附表等内容.洪水风险 图包括淹没范围风险图、淹没水深风险图、洪水流速风险图、到达时间风险图和淹没历时风险图.其中,淹没 水深分级标准为:0~0.5 m,0.5~1.0 m,1.0~1.5 m,1.5~2.5 m,2.5~5.0 m,>5.0 m.洪水流速分级标准 为:0~0.5 m/s,0.5~1.0 m/s,1.0~2.0 m/s,>2.0 m/s.本文列举 1991 年洪水的淹没水深风险图和洪水流 速风险图(见图 8).



3 结 语

利用一、二维实时动态耦合模型进行洪水演进数值模拟,能够很好地模拟出溃堤洪水演进情况.本文建 立了一维河道模型和二维洪泛区模型,并将一维模型与二维模型实时动态耦合起来,并通过干水深与湿水深 理论优化了模型.本文模拟了谷堆圩1991年洪水的演进情况,并利用1980年历史洪水进行模型的率定和验 证.根据模拟结果,编制了淹没水深风险图和洪水流速风险图.结果表明,一、二维实时动态耦合模型模拟的 结果,能够动态反映洪水溃堤、漫堤时河道与洪泛区的水流情况,结果更加符合实际情况.

本模型在模拟溃堤漫堤洪水时,计算精度较高,能够反映溃堤、漫堤洪水演进的途径、规模以及造成的淹 没影响.模拟结果能够为防汛决策、调度提供科学依据,为洪涝灾情评估、抢险救灾、灾后重建和土地开发利 用提供管理依据.然而,在无法准确得知溃堤与漫堤地点时,模型只能在多个地点都假设耦合节点,这导致建 模难度加大,增加了模型的计算耗时.本模型目前只能计算耦合点处的流量与水位,无法模拟耦合点附近的 流态.这些问题需要将水流与结构堤坝等水工建筑物结构进行耦合研究,形成溃堤、漫堤洪水流固耦合模型, 这些都是模型未来需要研究的地方.

参考文 献:

- MARIN J, MONNIER J. Superposition of local zoom models and simultaneous calibration for 1D-2D shallow water flows [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2009, 80(3): 547-560.
- [2] JOWETT I G., DUNCAN M J. Effectiveness of 1D and 2D hydraulic models for instream habitat analysis in a braided river[J]. Ecological Engineering, 2012, 48: 92-100.
- [3] 李大鸣, 管永宽, 李玲玲, 等. 蓄滞洪区洪水演进数学模型研究及应用[J]. 水利水运工程学报, 2011(3): 27-34. (LI Da-ming, GUAN Yong-kuan, LI Ling-ling, et al. Flood routing mathematical model for flood detention basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2011(3): 27-34. (in Chinese))
- [4] 赖锡军,汪德爟. 非恒定水流的一维、二维耦合数值模型[J]. 水利水运工程学报,2002(2):48-51. (LAI Xi-jun, WANG De-guan. 1-D and 2-D coupling numerical model of unsteady flow[J]. Hydro-Science and Engineering, 2002(2):48-51. (in Chinese))
- [5] 修海峰,吴联志,陈云. 基于 MIKE11 的平原河网洪水演进水动力研究[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(6): 1-4.
 (XIU Hai-feng, WU Lian-zhi, CHEN Yun. Hydrodynamic research of flood routing in the plain river network based on MIKE11
 [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(6): 1-4. (in Chinese))
- [6] AGGETT G R, WILSON P. Creating and coupling a high-resolution DTM with a 1-D hydraulic model in a GIS for scenario-based assessment of avulsion hazard in a gravel-bed river[J]. Geomorphology, 2009, 113(1): 21-34.
- [7] YU Da-peng. Parallelization of a two-dimensional flood inundation model based on domain decomposition [J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(8): 935-945.
- [8] 王晓玲,李明超,周潮洪,等.复杂河网中洪水演进二维数值仿真及其应用[J].天津大学学报,2005,38(5):416-421.
 (WANG Xiao-ling, LI Ming-chao, ZHOU Chao-hong, et al. 2D numerical simulation of flood routing in complex river network and its application[J]. Journal of Tianjin University, 2005, 38(5): 416-421. (in Chinese))
- [9] 姜晓明,李丹勋,王兴奎. 基于黎曼近似解的溃堤洪水一维-二维耦合数学模型[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 214-221. (JIANG Xiao-ming, LI Dan-xun, WANG Xing-kui. Coupled one-and two-dimensional numerical modeling of levee-breach flows using the Godunov method[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 214-221. (in Chinese))
- [10] FINAUD-GUYOT P, DELENNE C, GUINOT V, et al. 1D-2D coupling for river flow modeling [J]. Comptes Rendus Mécanique, 2011, 339(4): 226-234.
- [11] 王智勇,陈永灿,朱德军,等.一维-二维耦合的河湖系统整体水动力模型[J].水科学进展,2011,22(4):516-521.
 (WANG Zhi-yong, CHEN Yong-can, ZHU De-jun. 1D-2D coupled hydrodynamic simulation model of river-lake system[J].
 Advances in Water Science, 2011,22(4):516-521. (in Chinese))

[12] BLADÉE, GÓMEZ-VALENTÍN M, DOLZ J, et al. Integration of 1D and 2D finite volume schemes for computations of water flow in natural channels[J]. Advances in Water Resources, 2012, 42: 17-29.

A real-time dynamic coupling model for flood routing and its application to flood risk charting

FU Cheng-wei, YUAN Xi-min, YANG Min

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Floods caused by dike break and overtop can be simulated with a dynamically coupling model of 1D and 2D hydraulic model. Generally, the traditional 1D and 2D flood routing models are operated separately. Moreover, the traditional model would take a great amount of time to simulate, and the given results are not accurate. In this paper, a 1D-2D dynamic coupling model for the flood routing is developed through time synchronization and corresponding of space nodes. According to dry depth and wet depth theory, the traditional flood routing model is optimized, which saves much time for simulation. An example of Guduiwei flood detention basin is shown for rerifying the 1D-2D dynamic coupling model. Historical floods are simulated with the 1D-2D dynamic coupling model. Based on the results, a flood risk chart is established with standards. The results show that the 1D-2D dynamic coupling model is reasonable in simulating dike break-induced floods with much time saved.

Key words: 1D-2D dynamically coupling model; dry depth; wet depth; flood risk chart

水利部公益性行业科研专项经费项目"水利工程对水生物的影响和 保护措施研究"顺利通过验收

2013 年 7 月 31 日,水利部国际合作与科技司在南京主持召开了由南京水利科学研究院承担的水利部公益性行业科研专项经费项目"水利工程对水生物的影响和保护措施研究"验收会.验收专家组由长江水利委员会、黄河水利委员会、 淮河水利委员会、水利部太湖流域管理局、中国水利水电科学研究院、江苏省水利厅、江苏省水利科学研究院、中国水电顾问集团成都勘测设计研究院等单位的专家组成.水利部国科司科技处曾向辉调研员、我院李云副院长、以及课题组相关同志出席了会议.

项目完成了水生物工程保护措施现状调研、洄游水生物过坝关键技术、过饱和水体对下游河段鱼类影响、水生物过 坝技术资料数据库建设等研究内容.建立了鱼道设计流速与池室长度、竖缝最小宽度、相邻池室水位差间的影响关系及 相关计算公式;提出了鱼道隔板的布置型式和尺寸的优化方法,并推荐了竖缝式及组合式等两种常用隔板的较优体型及 尺寸;调查了典型水利工程下游出现的总溶解气体过饱和现象,构建了高压水箱概化模拟装置,获得了常见7种鱼类的 过饱和水体耐受度;提出了典型水利工程消减过饱和气体的运行措施和工程措施,提出了多水库联合调度控制河道总溶 解气体过饱和程度的方法;西江流域为依托,建立了水生物过坝技术数据库及专家库系统.验收专家组认真听取了项目 负责人的成果汇报,一致认为,该项目全面完成了任务书规定的工作内容,研究成果丰富,达到了预期目标.

摘自南京水利科学研究院网站

**

.)